第42卷 第3期
2022年6月
桂林电子科技大学学报
Journal of Guilin University of Electronic Technology
Vol. 42,No. 3
Jun. 2022

辅助物镜的结构优化设计

于方津,李文杰

(桂林电子科技大学 机电工程学院,广西 桂林 541004)

摘 要:为了更好地选择一个合适的的辅助物镜,基于辅助物镜的工作原理,从理论推导和实验仿真两方面出发,对常见双胶合形式的辅助物镜进行了结构优化设计。根据设计要求,合理选择辅助物镜的初始结构,并从理论上推导了各类像差。基于初始结构和优化目标,利用光学设计软件OSLO对2种形式的辅助物镜进行了结构优化和像差分析。之后对于创新型双胶合-厚弯月型辅助物镜进行设计优化,以文献中相似透镜的结构参数为该设计的初始结构,利用OSLO光学软件及设计经验,对其进行结构优化、像差分析及矫正。对2种形式的辅助物镜进行对比分析的结果表明,2种结构形式的辅助物镜经过优化后,其参数均能满足设计要求,但双胶合-厚弯月型的辅助物镜更适用于大像面的光学系统。

关键词:光学设计;辅助物镜结构设计;光学像差优化;OSLO;无限远像距

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-808X(2022)03-0187-07

Structural optimization design of auxiliary objective lens

YU Fangjin, LI Wenjie

(School of Mechatronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to better choose a suitable auxiliary objective lens, this article is based on the working principle of the auxiliary objective lens, starting from both theoretical deduction and experimental simulation, firstly, the structure optimization design of the common double glued auxiliary objective lens is carried out. According to the design requirements, the initial structure of the auxiliary objective lens was reasonably selected, and various aberrations were theoretically deduced. Finally, based on the initial structure and optimization goals, the optical design software OSLO is used to optimize the structure and aberration analysis of the two forms of auxiliary objective lenses. Afterwards, the design of the innovative double cemented-thick meniscus auxiliary objective lens was optimized. The structural parameters of the similar lens in the literature were used as the initial structure of the design. OSLO optical software and design experience were used to optimize the structure and analyze aberrations. And correction. Finally, the two types of auxiliary objectives are compared and analyzed. The results show that the parameters of the two types of auxiliary objectives after optimization can meet the design requirements, but the double-bonded-thick meniscus type auxiliary objective is more suitable for large images. The optical system of the surface.

Key words: optical design; auxiliary objective structure design; optical aberration optimization; OSLO; infinite image distance

由于无限远像距物镜的物体置于其物方焦点,而像方出射光线为平行光,需要用辅助物镜将平行光汇聚到像方焦平面来成像[1],辅助物镜的质量对最终的成像质量有较大影响。高兴宇等[2]曾在共聚焦显微镜的设计中加入了辅助物镜,并完成了像差分析,其与前置物镜之间形成的一段平行光路有利于共聚焦显微系统实现横向扫描。徐思轶等[3]在红外显微镜设计中也加入了辅助物镜,使系统中形成一段平行光路,在加入一些辅助器件时可保证放大倍率的一致性。但在这些实例中并无较详细的辅助物镜结构设

收稿日期:2021-01-06
基金项目:广西科技基地人才专项(2018AD19077)
通信作者:李文杰(1987—),男,副教授,博士,研究方向为先进成像技术、机器视觉、三维成像技术。E-mail:515247812@qq.com
引文格式:于方津,李文杰. 辅助物镜的结构优化设计[J]. 桂林电子科技大学学报,2022,42(3):187-193.

计与优化方案。

辅助物镜涉及的光学指标主要包括入射光瞳直径、焦距视场及相对孔径。这些光学系统的指标会直接影响成像质量。由于介质折射率不均匀，与光子一起传播的波阵面会发生变形。因此，光学系统形成的像差是可以减小的，只要选择合适的透镜和优化设计参数，就可以消除像差。

OSLO(optics software for layout and optimization)是 20 世纪 70 年代由美国 Lambda Research 公司开发的一款光学设计专用软件[4-6]，具有界面简单、易操作、优化速度快等优点，是国内外主流的光学设计软件之一。辅助物镜涉及的光学指标主要包括入射光瞳直径、相对孔径、焦距和视场，它们影响着成像系统的分辨率、观测区域大小及成像大小等。鉴于此，以 OSLO 为设计工具，从像差理论和实验仿真两方面，根据设计目标要求对基于双胶合形式的辅助物镜和基于双胶合-厚弯月形式的摄远辅助物镜 2 种常用的辅助物镜进行结构分析和优化设计。

1　基于双胶合结构形式的辅助物镜设计

1.1　初始结构参数计算

双胶合透镜组是一种最常用的辅助物镜结构，其结构形式最为简单，且可以同时校正轴上球差、正弦差、色球差 3 种像差。

图 1 为双胶合透镜组合的光路示意图，2 条辅助线表示物体 AB 的边缘光线，由轴上物点 A 发出的光线为第一辅助光线，由轴外点 B 发出的光线为第二辅助光线。物高为 y，像高为 $-y'$，d 为两透镜组之间的距离，n'、u' 分别为系统像空间的折射率和孔径，是系统的拉格朗日不变量，$J=n'u'y'$，h、h_z 为透镜组的外部参数。

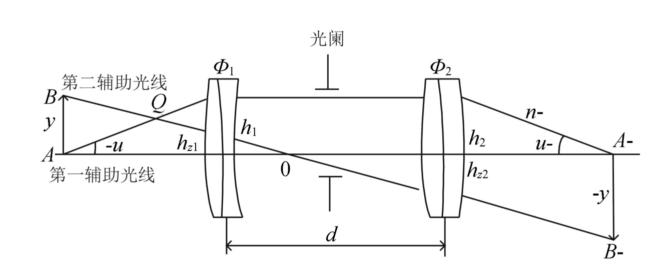


图 1　双胶合透镜组合的光路示意图

光学系统的初始参数一般可由以下 2 种方法得到：1)从现有资料中找到一个光学特性相近的系统；2)根据设计目标中所提的参数和像差要求，利用薄透镜系统初级像差理论公式，直接求出结构参数[7-9]。由于通过薄透镜系统初级像差理论公式计算出的初始参数更贴近要求，更利于像差的准确校正，本研究采用方法 2)来获取辅助物镜的结构参数。根据对双胶合辅助物镜设计的光学特性[10]要求，需要的主要技术指标如表 1 所示。

表 1　双胶合辅助物镜主要技术指标

名称	指标值
焦距 f'/mm	200
通光直径 D/mm	18
视场角 $2w$/(°)	3.7
棱镜型号	ZF1
棱镜展开总厚度/mm	180

为了补偿目镜的像差，整个辅助物镜系统的像差要求为：轴上球差 $\Delta L'_{\mathrm{m}}=0.04$ mm，正弦差 $S'_{\mathrm{m}}=-0.000\,7$ mm，色球差 $\Delta L'_{\mathrm{FC}}=0.05$ mm。无限远像距光学系统如图 2 所示。双胶合物镜的初始结构参数[11]如图 3 所示，初始系统如图 4 所示。

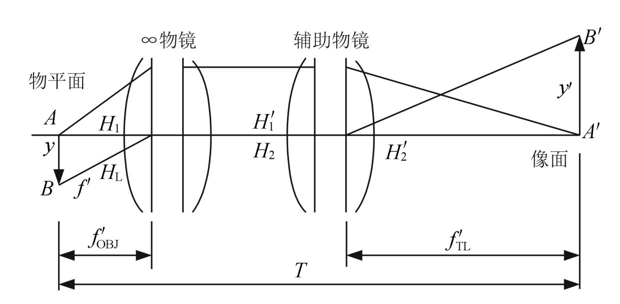
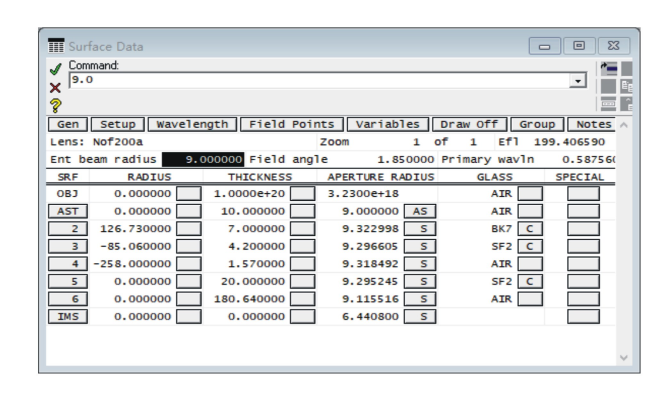


图 2　无限远像距光学系统



SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS		GLASS		SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	3.2300e+18		AIR		
AST	0.000000	10.000000	9.000000	AS	AIR		
2	126.730000	7.000000	9.322998	S	BK7	C	
3	-85.060000	4.200000	9.296605	S	SF2	C	
4	-258.000000	1.570000	9.318492	S	AIR		
5	0.000000	20.000000	9.295245	S	SF2	C	
6	0.000000	180.640000	9.115516	S	AIR		
IMS	0.000000	0.000000	6.440800	S			

图 3　双胶合物镜的初始结构参数

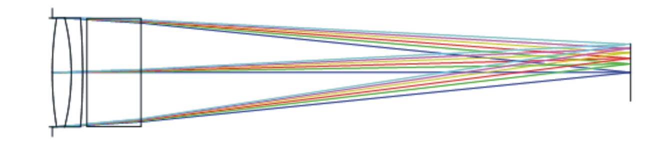


图 4　双胶合物镜初始系统

1.2　基于 OSLO 软件的双胶合辅助物镜结构优化

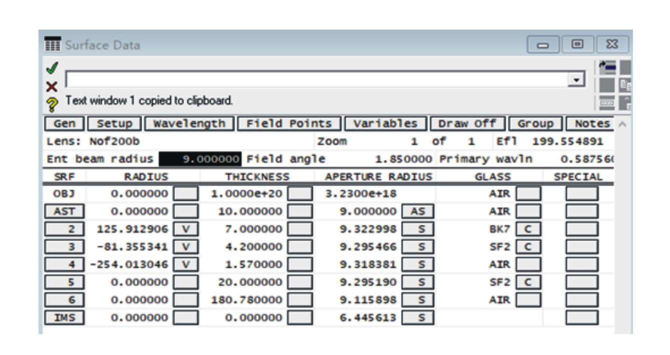
根据初始结构参数,在 OSLO 的数据编辑表中新建系统,输入初始数据,得到初始结构并对其进行光路追迹及像质评价。一般来说,初始结构的成像质量都较差,必须对初始参数进行优化。传统的光学设计过程需要大量计算公式,过程较繁琐,耗时费力。

用 OSLO 光学自动设计软件拥有的优化函数可以实现快速优化,并能直观地输出图形结果,可大大减少计算量。在 OSLO 软件中,可以以曲率半径、面间厚度或玻璃折射率为变量进行优化。由于面间厚度对于双胶合物镜设计的像差影响较小,设置的自变量为 3 个球面的曲率半径,而面间厚度和玻璃型号可根据情况进行手动修改。

在优化过程中,若多次循环迭代后的像差值仍不能满足要求时,则可根据经验对参数进行手动修改。实践表明,若对曲率半径较小面的参数进行修改,一般会对结果影响较大,也可适当改变厚度值;但玻璃型号一般不做修改,否则易使之前的优化过程全部失效。

由于光学系统优化是一个变量多、输出多的过程,不仅要考虑调制传递函数(MTF)值,还要考虑其他像差因素,其最优解不唯一,要综合考虑各个因子所占的比重。对于双胶合辅助物镜,一般要求校正轴上球差、正弦差、色球差这 3 种像差。除了这 3 种像差外,透镜组的光焦度也是必须满足的一个像差参数,因此共需校正 4 种像差。

经过长时间的优化迭代,得到了较为理想的一组结构参数,其中:双胶合物镜优化后参数如图 5 所示;双胶合物镜 MTF 曲线如图 6 所示;双胶合物镜几何像差如图 7 所示;双胶合物镜点扩散函数如图 8 所示。根据像质评价函数和像差分析图,对所优化的光学结构参数进行分析,可得最优的像质。



SRF	RADIUS		THICKNESS		APERTURE RADIUS		GLASS		SPECIAL
OBJ	0.000000		1.0000e+20		3.2300e+18		AIR		
AST	0.000000		10.000000		9.000000	AS	AIR		
2	125.912906	V	7.000000		9.322998	S	BK7	C	
3	-81.355341	V	4.200000		9.295466	S	SF2	C	
4	-254.013046	V	1.570000		9.318381	S	AIR		
5	0.000000		20.000000		9.295190	S	SF2	C	
6	0.000000		180.780000		9.115898	S	AIR		
IMS	0.000000		0.000000		6.445613	S			

图 5　双胶合物镜优化后参数

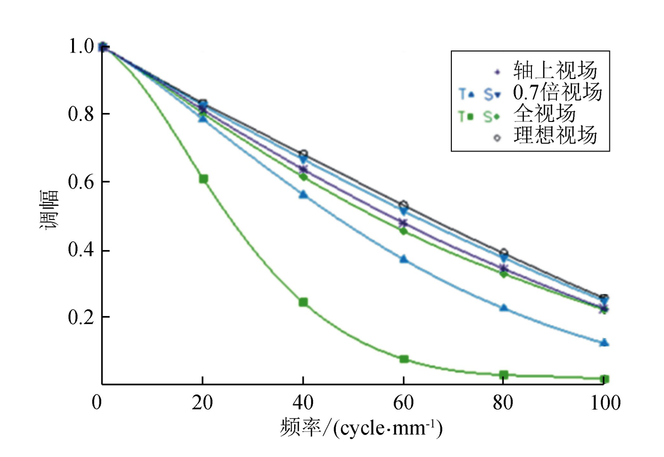


图 6　双胶合物镜 MTF 曲线

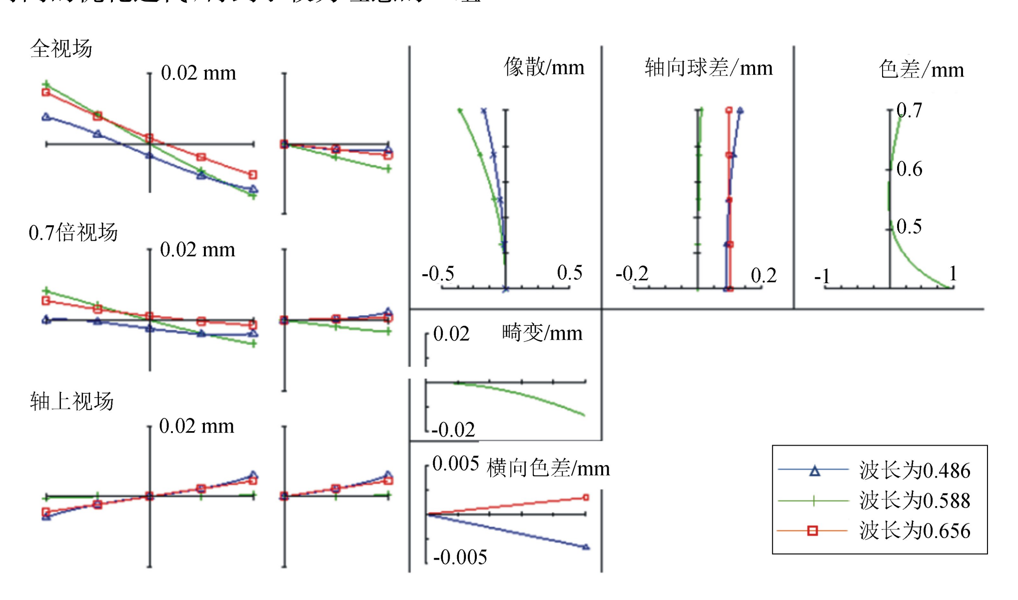


图 7　双胶合物镜几何像差

由图 6、7、8 可知:1)全视场 40 lp/m 时,MTF≥0.2;2)像曲校正得很好,相对畸变为 0.75%。由瑞

图 8　双胶合物镜点扩散函数

利准则可知，当波像差的最大值小于 $\lambda/4$ 时，可认为实际波面是完整的。由图 7 可得，当波像差 $\leqslant\lambda/4$ 时，相应的中心亮斑所占能量 $\geqslant 68\%$，符合设计标准。综上所述，该双胶合物镜达到了预期的优化效果，可适用于大部分的光学系统设计。

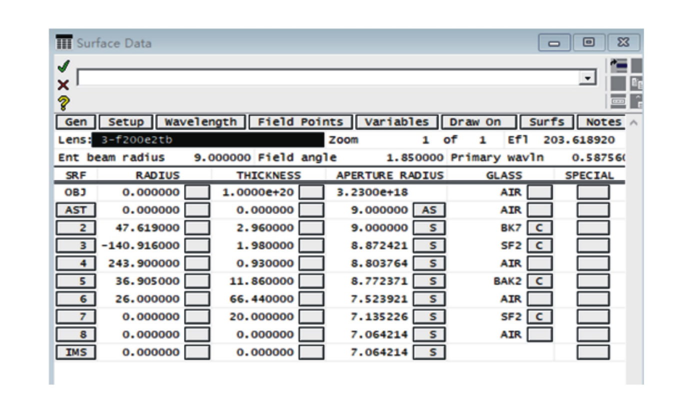
2　基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜结构设计

2.1　初始参数选择

由于双胶合望远镜物镜的结构简单，校正像差的能力有限，基本上只考虑初级像差，其初级像差求解过程和像差微量校正过程都比较简单。在初始结构的选择上，可通过初级像差求解计算或从相应资料中选取一个较为合适的参数作为初始结构，但对于视场大的物面成像就显得不足，主要是边缘像差大，成像不够清晰。

一些光学结构比较复杂的辅助物镜，例如，对于结构形式为双胶合-厚弯月的辅助物镜的设计，其初级像差求解过程就不如双胶合物镜那样容易。双胶合-厚弯月的透镜组是一种创新的辅助物镜结构形式，它的结构形式比双胶合的透镜组复杂，可同时校正轴上球差、正弦差、色球差、像散等多种像差，且成像像面更大，更符合无限远像距光学系统的设计要求。

选取文献[12]中与目标要求类似的一组结构参数，作为基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜的初始参数。根据对基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜设计提出的光学特性要求，取主要技术指标：焦距 $f'=200$ mm，通光直径 $D=18$ mm，视场角 $2\omega=3.7°$。将初始参数输入 OSLO 软件，得到基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜初始参数，如图 9 所示。辅助物镜系统如图 10 所示。


Surface Data

Gen | Setup | Wavelength | Field Points | Variables | Draw On | Surfs | Notes

Lens: 3-f200e2tb　Zoom 1 of 1　Efl 203.618920

Ent beam radius 9.000000　Field angle 1.850000　Primary wavln 0.58756

SRF	RADIUS		THICKNESS		APERTURE RADIUS		GLASS		SPECIAL
OBJ	0.000000		1.0000e+20		3.2300e+18		AIR		
AST	0.000000		0.000000		9.000000	AS	AIR		
2	47.619000		2.960000		9.000000	S	BK7	C	
3	-140.916000		1.980000		8.872421	S	SF2	C	
4	243.900000		0.930000		8.803764	S	AIR		
5	36.905000		11.860000		8.772371	S	BAK2	C	
6	26.000000		66.440000		7.523921	S	AIR		
7	0.000000		20.000000		7.135226	S	SF2	C	
8	0.000000		0.000000		7.064214	S	AIR		
IMS	0.000000		0.000000		7.064214	S			

图 9　基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜初始参数

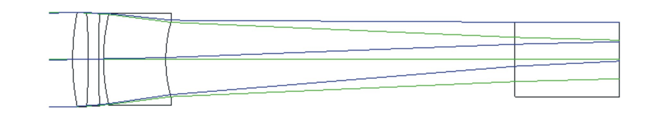


图 10　基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜系统

2.2　基于 OSLO 的结构优化设计

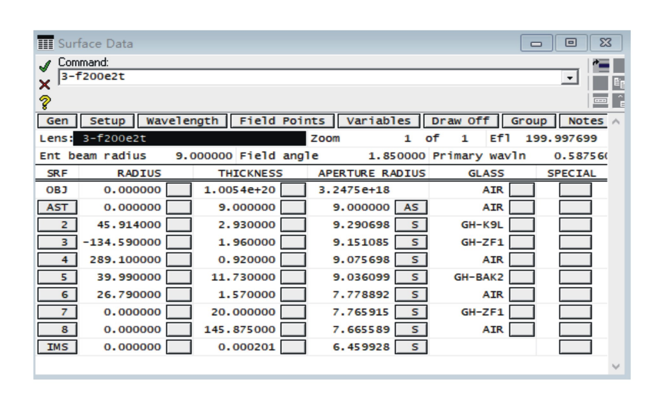
使用光学自动设计软件进行光学设计。首先根据初始系统,在 OSLO 的面数据编辑表中新建系统,输入初始数据,得到初始结构并对其进行光路计算和像差评价。一般来说,初始结构的成像质量都很差,必须对初始参数进行优化。

值得注意的是,若仅依靠 OSLO 软件中的自动优化功能对光路进行优化和仿真,有时并不能获得最优结果。因为光学软件在对光学系统优化过程中,依靠误差函数在不同变量的不同范围内寻找到最小值后,输出优化结果,但软件的设定可能会在这一条件下出现多个极小值。极小值并不等于最小值,也会在校正一种像差时,使另一种像差变化。这时就要依靠经验手动修改某个变量的值,再考虑从其他方面尝试优化。总之,光学系统的优化过程要通过大量的练习和实践探索其中的规律,从而找到高效准确的方法。

得到初始结构参数后,为了得到更好的成像质量,对初始结构参数进行优化。将图 7 所示的初始结构参数输入 OSLO 软件,经焦距缩放、更换玻璃、减少镜片等[13]优化设计后,得到一组成像效果较好的参数;在此基础上,进行一些细微的参数校正,最终得到一组较为理想的双胶合-厚弯月型辅助物镜参数,如图 11 所示。

基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜的结构形式为双胶合-厚弯月,其后组透镜的光焦度为负值,所以该物镜不仅可以校正球差、色差、彗差和像散,还可以校正场曲[14-15]。但由于其结构较复杂,满足初级像差的解往往不唯一,因此又产生了一个如何选择解的问题,这就需要进行高级像差的校正。

优化后的基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜 MTF 曲线、基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜几何像差、基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜点扩散函数图分别如图 12、13、14 所示。



SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS		GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0054e+20	3.2475e+18		AIR	
AST	0.000000	9.000000	9.000000	AS	AIR	
2	45.914000	2.930000	9.290698	S	GH-K9L	
3	-134.590000	1.960000	9.151085	S	GH-ZF1	
4	289.100000	0.920000	9.075698	S	AIR	
5	39.990000	11.730000	9.036099	S	GH-BAK2	
6	26.790000	1.570000	7.778892	S	AIR	
7	0.000000	20.000000	7.765915	S	GH-ZF1	
8	0.000000	145.875000	7.665589	S	AIR	
IMS	0.000000	0.000201	6.459928	S		

图 11　基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜优化后参数

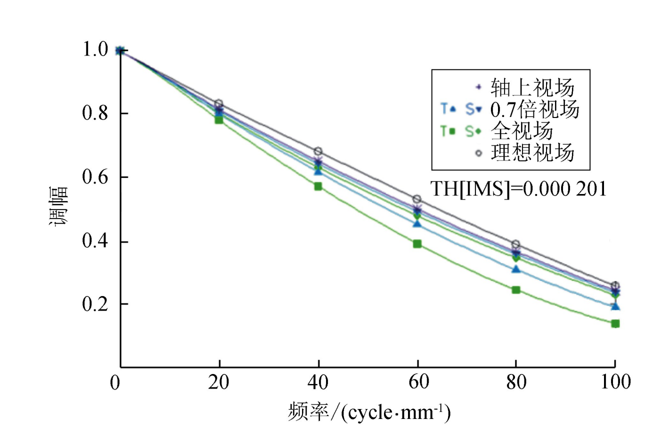


图 12　基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜 MTF 曲线

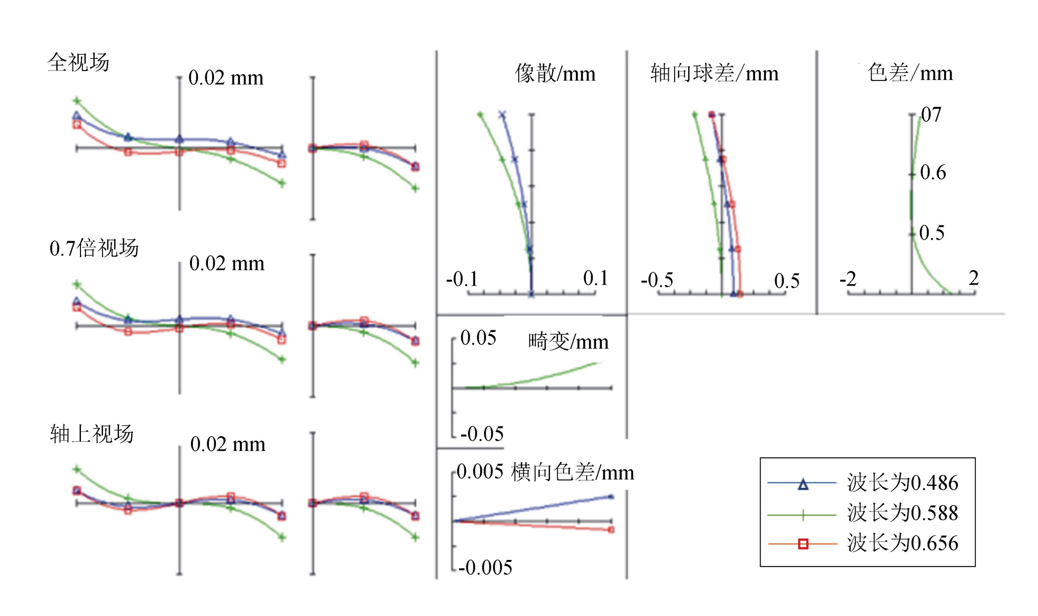


图 13　基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜几何像差

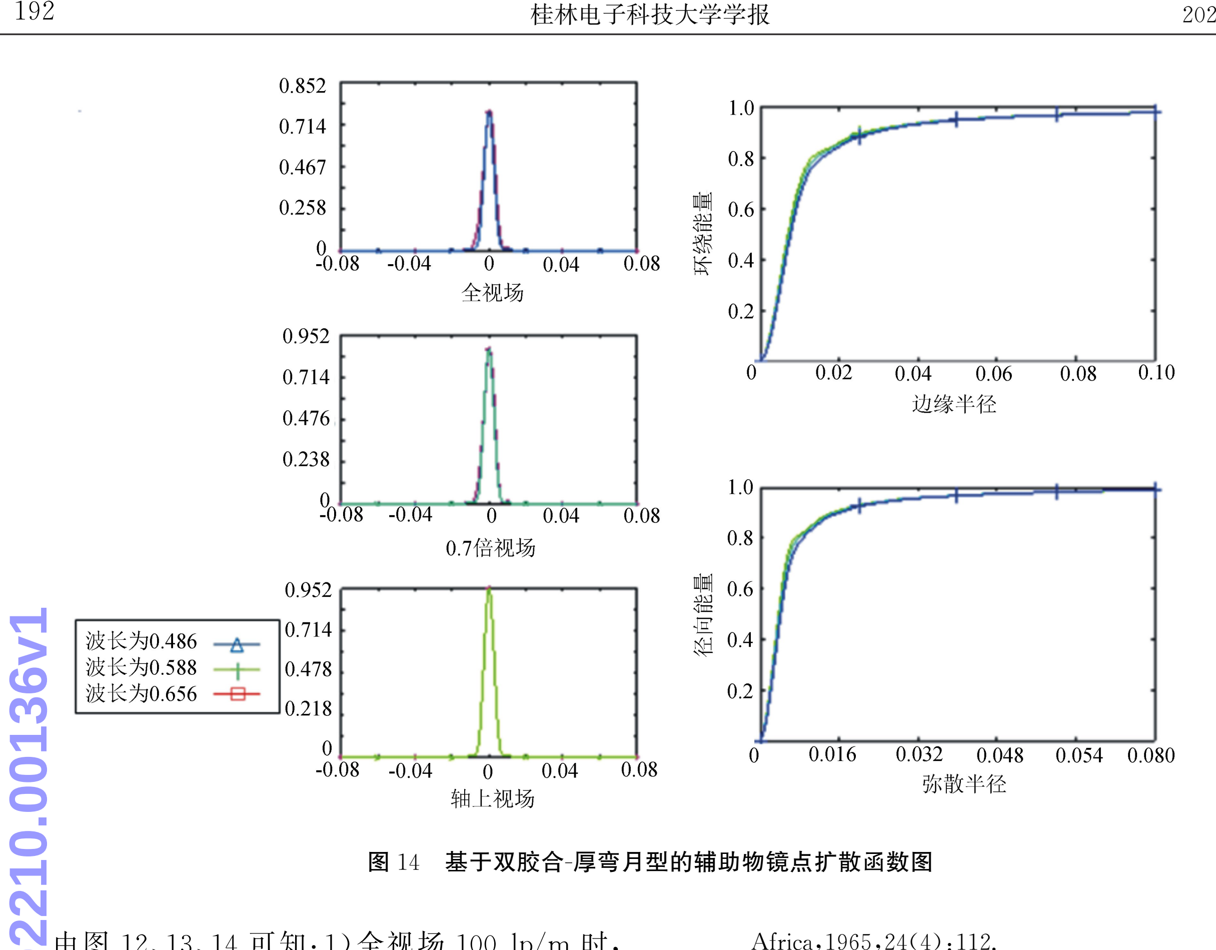


图 14 基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜点扩散函数图

由图 12、13、14 可知：1）全视场 100 lp/m 时，MTF≥0.15；2）像曲校正较好，相对畸变为 0.08%。当波像差≤λ/4 时，对应的中心亮斑所占能量≥68%。所设计的物镜在全视场内反映出的波像差≤λ/4，符合标准。该基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜设计达到了预期的优化效果。

3 结束语

基于像差理论[16]和光学设计软件 OLSO 对 2 种常见的辅助物镜进行结构优化。基于双胶合的辅助物镜具有结构简单、体积小等优点，但像差校正效果一般，而基于双胶合-厚弯月型的辅助物镜虽然结构较为复杂，但具有更好的校正像差的能力[17-21]。设计者可根据具体的光学设计需求选择相应的辅助物镜的结构形式。

参考文献：

[1] 李志能. 现代光学系统原理[M]. 北京：北京理工大学出版社，1994：22-25.
[2] 高兴宇，萧泽新，伍世荣. 基于 OSLO 的无限远像距消色差显微物镜的设计[J]. 光学与光电技术，2006(4)：4-7.
[3] 徐思轶，李茂忠，木锐，等. 红外显微物镜设计[J]. 红外技术，2015，37(11)：938-942.
[4] HORN R F. The history of the telescope objective[J]. Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa，1965，24(4)：112.
[5] LI X Y，GUO L F，DONG H，et al. In situ observation of surface electrochemical activities of lean duplex stainless steel LDX 2101[J]. Steel Research International，2013，84(2)：155-162.
[6] AIGHD H. Referencing the infinity focus of achromatic telescope objectives[J]. Physics Education，2019，54(5)：055013.
[7] 范应娟. 大相对孔径折射式望远物镜的设计[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版)，2010，28(2)：131-133.
[8] 李松岩，梁秀玲. 大孔径长焦距摄远物镜光学系统设计[J]. 应用光学，2020(2)：276-281.
[9] 李林，黄一帆，王涌天. 现代光学设计方法[M]. 2 版. 北京：北京理工大学出版社，2015：14-18.
[10] 杜广庆，张孝林，赵小侠，等. 二元光学器件实现含转像棱镜望远物镜像差补偿研究[J]. 光子学报，2009，38(8)：1996-2000.
[11] 李士贤，李林. 光学设计手册[M]. 2 版. 北京：北京理工大学出版社，1996：56-60.
[12] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 3 版. 北京：电子工业出版社，2014：95-99.
[13] 萧泽新. 照相物镜移植应用的研究[J]. 光学技术，1999(4)：78-81.
[14] 胡玉禧，安连生. 应用光学[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，1996：184-185.
[15] KINGSLAKE R. Optical system design[M]. Pittsburgh：Academic Press，1983.

[16] 李旭阳,李英才,马臻,等. 大 F 数长焦距空间相机系统设计[J]. 光学学报,2010,30(7):2093-2097.
[17] 邓英剑,杨冬生. 公差配合与测量技术[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2008.
[18] 洪坚. 3.2～8 mm 百万像素变焦安防镜头设计[J]. 光学仪器,2014,36(2):131-135.
[19] NEIL I A. Optimization glitches in zoom lens design [C]//Proceedings of SPIE 3129, Zoom Lenses II, San Diego, CA: SPIE, 1997: 157-180.
[20] COX A, KING A L. A system of optical design[J]. American Journal of Physic, 1966, 43(1): 79-83.
[21] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2007:278-332.

编辑:张所滨